УДК 69.05
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-1-34-43

Научная статья

Исследование ветровых нагрузок на отдельно стоящие и близкорасположенные гиперболоидные градирни

В. В. Дутов ✉, **А. С. Чепурненко**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ vlad553188@gmail.com

Аннотация

Введение. Строительство градирен было и остается актуальным в современном мире. Распространение башенных градирен необходимо для энергетической промышленности. Проблема заключается в допустимом расположении совокупности градирен гиперболоидного типа на одном объекте топливно-энергетического комплекса. Цель представленной работы — исследование распределения ветрового давления на градирню в форме однополостного гиперболоида вращения, а также взаимного влияния близко расположенных градирен. В рамках поставленной цели решаются следующие задачи: построение конечно-элементных моделей отдельно стоящего и нескольких близко расположенных сооружений, анализ изополей ветрового давления на различных отметках и сопоставление результатов с положениями действующих норм.

Материалы и методы. Объект исследования — башни гиперболоидного типа, общая высота которых составляет 53,3 м. Анализ выполняется при помощи трехмерного конечно-элементного моделирования в модуле CFX верифицированного программного комплекса ANSYS. Используется модель турбулентности — k-epsilon. Скорость ветра в качестве упрощения принимается постоянной по высоте сооружения. Оболочки в форме однополостного гиперболоида задаются параметрическим уравнением совместно с воздушным пространством, которое моделируется объемными конечными элементами в форме тетраэдров. Поверхность оболочек принимается идеально гладкой. Помимо конечно-элементного анализа выполнен расчет на коэффициент помех по действующим нормам для железобетонных градирен.

Результаты исследования. Получены результаты по распределению ветрового давления на отдельно стоящие и близкорасположенные градирни. Приведены изополя ветрового давления на различных отметках при различном расположении башенных сооружений.

Обсуждение и заключения. В результате сопоставления полученных результатов с действующим СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» и СП 340.1325800.2017 «Конструкции железобетонные и бетонные градирен. Правила проектирования» выявлено, что распределение ветрового давления по окружности зависит от высоты, что не учитывается в нормативной документации. Произведен анализ взаимного влияния близко расположенных башенных градирен, и показано, что в действующих нормах сильно завышается коэффициент помех.

Ключевые слова: градирня, однополостной гиперболоид вращения, помехи, ветровое давление, турбулентность, метод конечных элементов.

Для цитирования: Дутов, В. В. Исследование ветровых нагрузок на отдельно стоящие и близкорасположенные гиперболоидные градирни / В. В. Дутов, А. С. Чепурненко // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2023. — Т. 2, № 1. — С. 34–43. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-1-34-43.

Original article

Study of Wind Loads on Free-Standing and Closely Spaced Hyperbolic Cooling Towers

Vladislav V. Dutov ✉, **Anton S. Chepurnenko**

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ vlad553188@gmail.com

Abstract

Introduction. The construction of cooling towers has always been and remains a pressing issue in today's world. Wide spreading of cooling towers is necessary for power industry. The problem lies in the allowable location of a set of hyperbolic cooling towers at a premises of a single fuel-and-energy facility. The aim of the present study is to investigate the wind pressure distribution on a cooling tower having the shape of a single-cavity hyperboloid of rotation and the cross-interference of the closely spaced cooling towers. To achieve the set forth aim the following objectives are being solved: the finite-element modeling of a free-standing and several closely spaced structures, the analysis of the wind pressure isofields at different elevations and the comparison of the results with the currently valid standards.

Materials and methods. The object of the study is the hyperboloid type cooling towers of total height 53.3 m. The analysis is carried out with the help of the three-dimensional finite-element modeling in the CFX module of the verified ANSYS software package. The k-epsilon turbulence model is used. For simplification, the wind speed is assumed constant along the structure's height. The shells in the shape of a single-cavity hyperboloid including the airspace are specified by a parametric equation, which is modeled by using the solid finite elements in the form of tetrahedrons. The surface of the shells is assumed to be perfectly smooth. Besides finite-element analysis, the calculation of the interference factor is made according to the standards currently valid for reinforced concrete cooling towers.

Results. The results of wind pressure distribution on free-standing and closely spaced cooling towers were obtained. The data on the wind pressure isofields at various elevations at various locations of tower structures was given.

Discussion and conclusions. Upon comparing the obtained results with the currently valid SP 20.13330.2016 «Loads and actions» and SP 340.1325800.2017 «Reinforced concrete and concrete structures of cooling towers. Design rules» it was found that the distribution of wind pressure along circumference depends on the height, which had not been taken into account in the regulatory documentation. The analysis of cross-interference of the closely spaced cooling towers was carried out and it was demonstrated that in the currently valid standards the interference factor had been greatly overestimated.

Key words: cooling tower, single-cavity hyperboloid of rotation, interference, wind pressure, turbulence, finite element method.

For citation. V. V. Dutov, A. S. Chepurnenko. Study of Wind Loads on Free-Standing and Closely Spaced Hyperbolic Cooling Towers. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2023, vol. 2, no. 1, pp. 34–43. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-1-34-43.

Введение. Башенные градирни — это теплообменные аппараты для отвода тепловой нагрузки в атмосферу. Тонкостенные оболочки железобетонных градирен настроены на охлаждение большого объема жидкости до необходимой температуры (перепад температур составляет 5-10 °C). Градирня представляет собой установку из железобетона или металла, имеющую форму усеченного конуса или гиперболоида вращения. Воздушная тяга создается естественным образом без использования дополнительного энергоемкого оборудования [1]. Другое название для башенной градирни — «мокрые» или испарительные градирни, в которых вода находится в прямом контакте с воздухом. Высота, размер и форма варьируются в зависимости

от требуемой производительности и климатических условий. В общемировой строительной практике обширно используются конструкции в виде однополостного гиперболоида вращения [2]. Основной сферой использования таких форм является промышленное строительство. Пример поверхности однополостного гиперболоида вращения можно наблюдать в очертаниях вытяжных башен градирен, водонапорных и радиотрансляционных башен, опор линий электропередач [3]. Успешное применение гиперболических оболочек вращения в строительстве обусловлено спецификой их геометрии. У такого гиперболоида есть единственная линейчатая поверхность вращения общего вида, которая может быть представлена в виде цилиндра, конуса или плоскости.

К преимуществам башенных градирен относятся: надежная работа в условиях жаркой окружающей среды; возможность охлаждения технологической воды ниже температуры сухого термометра; энергонезависимость — при работе таких установок не требуется электроэнергия; высокая эффективность при простоте эксплуатации и обслуживания; длительный срок службы [4]. Вместе с тем имеются и недостатки: относительная высокая стоимость оборудования и монтажа; высокие эксплуатационные расходы, включающие частую обработку (долив воды), обслуживание компонентов системы; необходимость выделения площади под строительство [5]. Однако все недостатки полностью окупаются вышеупомянутыми преимуществами.

Одним из основных воздействий, на которые рассчитываются железобетонные градирни, является давление ветра. Сложная форма гиперболоидных градирен обуславливает особый характер распределения ветровой нагрузки по их поверхности. При наличии на объекте нескольких расположенных рядом башенных градирен необходимо также учесть возникающие при этом помехи для ветрового потока. Действующие нормы проектирования железобетонных градирен в данном вопросе весьма консервативны, в них используются зависимости, полученные для сооружений цилиндрической формы. Целью настоящей работы явилось исследование распределения ветрового давления на градирню в форме однополостного гиперболоида вращения, а также взаимного влияния близко расположенных градирен.

В рамках поставленной цели были рассмотрены следующие задачи: изучение влияния взаимного расположения градирен на характер распределения ветрового давления, выявление допустимого расстояния между башенными градирнями.

Материалы и методы. Для решения задачи аэродинамики гиперболоидных градирен нами выполнено конечно-элементное моделирование в трехмерной постановке. Рассматриваются оболочки в форме однополостного гиперболоида вращения (рис. 1).

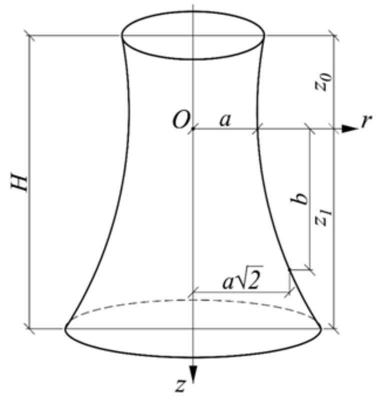


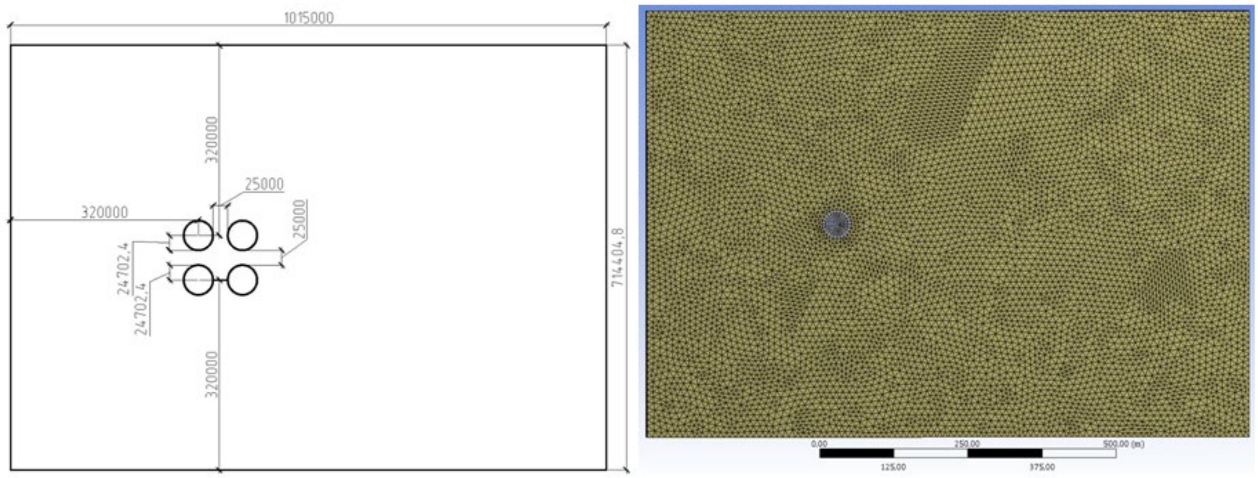
Рис. 1. Градирня гиперболоидного типа (рисунок авторов)

Уравнение меридиана поверхности оболочки имеет вид [6]:

$$r = \frac{a}{b}\sqrt{b^2 + z^2} \tag{1}$$

где a и b — параметры гиперболы.

Расчет выполняется при следующих значениях геометрических параметров: a = 13 м, b = 28,16 м, параметры гиперболы; z_0 = –7,8 м; z_1 = 45,5 м. Таким образом, общая высота градирни составляет 53,3 м. Расположение башенных градирен показано на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Расположение башенных градирен:
а) геометрическая схема; б) конечно-элементная модель в ANSYS [7] (рисунок авторов)

Расчет производится в программном комплексе ANSYS 2019. Воздушное пространство задано размерами 1015000×714404,8×80000 мм. Расстояние между градирнями, равное 25 м, было определено по табл. 4 СП 18.13330.2019, как 0,5×D (но не менее 18 м), где D – диаметр градирни на уровне входных окон.

Объем воздуха моделируется объемными конечными элементами в виде тетраэдров [8]. Около башни выполняется сгущение сетки с минимальным размером ребра конечного элемента 5 м. Для конечных элементов, удаленных от башни, размер ребра составляет 10 м.

Задача аэродинамики рассчитывается в модуле Fluid flow CFX ANSYS [9]. Уравнение поверхности задается в виде:

$$X = \frac{13}{28{,}16} \cdot \sqrt{(28160 \cdot 28160 + [u] \cdot [u])} \cdot cos([v])$$

$$Y = [c] \cdot [u]$$

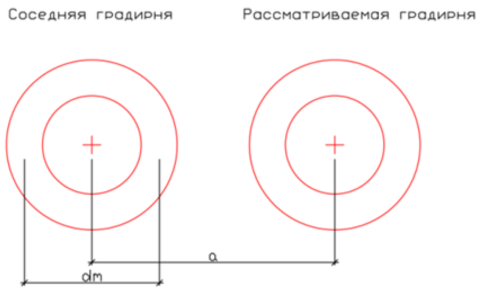
$$Z = \frac{13}{28{,}16} \cdot \sqrt{(28160 \cdot 28160 + [u] \cdot [u])} \cdot sin([v])$$

Коэффициент помех определён по СП 340.1325800.2017 «Конструкции железобетонные и бетонные градирен. Правила проектирования» на основании рис. 3.

Коэффициент помех F_1 определяется по формуле:

$$F_1 = 1 + 0{,}1 \cdot \frac{a_1}{d_m} - \frac{a}{d_m} \geq 1{,}0, \tag{2}$$

где a = 74,1072 — расстояние между градирням; a_1/d_m = 4 — предельное значение параметра по графику.



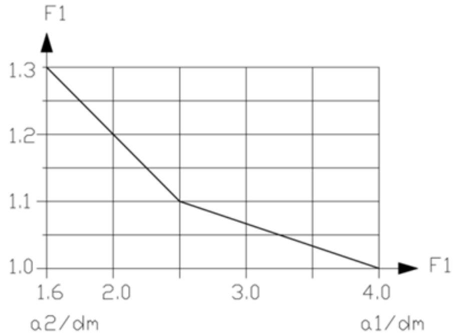


Рис. 3. а) Расстояние между градирнями б) График помехи «градирня – градирня» для зависимости параметра a/d_m от расстояния между верхним пределом a_1/d_m и нижним пределом a_2/d_m (рисунок авторов)

Радиусы тонкостенной оболочки найдены по формуле (1). Радиус нижней кромки оболочки:

$$r_1 = \frac{13}{28{,}16}\sqrt{28{,}16^2 + 45{,}5^2} = 24{,}7024, \text{ м.}$$

Радиус оболочки в горловине:

$$r_2 = \frac{13}{28{,}16}\sqrt{28{,}16^2 + 7{,}8^2} = 13{,}4895, \text{ м.}$$

Средний диаметр оболочки:

$$d_m = \frac{d_u + d_t}{2}.$$

$$d_m = (49{,}4048+26{,}979)/2 = 38{,}1919, \text{ м.}$$

Подставив полученные значения в формулу (2), получим:

$$F_1 = 1 + 0{,}1 \cdot \left(4 - \frac{74{,}1072}{38{,}1919}\right) \geq 1{,}0,$$

$$F_1 = 2{,}2656 > 1{,}0.$$

В качестве модели турбулентности в ANSYS используется модель k-epsilon. Данная модель фокусируется на механизмах, которые влияют на кинетическую энергию турбулентности [10]. Уровень турбулентности принят средний (5 %).

На входной грани «Inlet» задается скорость ветра 20 м/с, которая упрощенно принимается постоянной по высоте, как это делается, например, в [11]. На выходной грани «Outlet» и верхней грани объема воздуха (*Top*) избыточное давление *P* принимается равным нулю. Для поверхности земли и поверхности оболочки принимаются граничные условия типа «Wall» (стена). Ввиду небольшой относительной шероховатости поверхности гиперболоидных градирен из монолитного железобетона поверхность оболочки в ANSYS принимается абсолютно гладкой [12–15].

Результаты исследования. Распределение ветрового давления на разных высотах для отдельно стоящей градирни показано на рис. 4–6.

На глобальном диапазоне минимальное и максимальное значение ветровой нагрузки: *min* = 378,821 Па; *max* = 225,284 Па.

В локальном диапазоне на высоте 5 м минимальное и максимальное значение ветровой нагрузки: *min* = 334,833 Па; *max* = 224,425 Па.

На высоте 30 м минимальное и максимальное значение ветровой нагрузки: *min* = 366,419 Па; *max* = 217,442 Па.

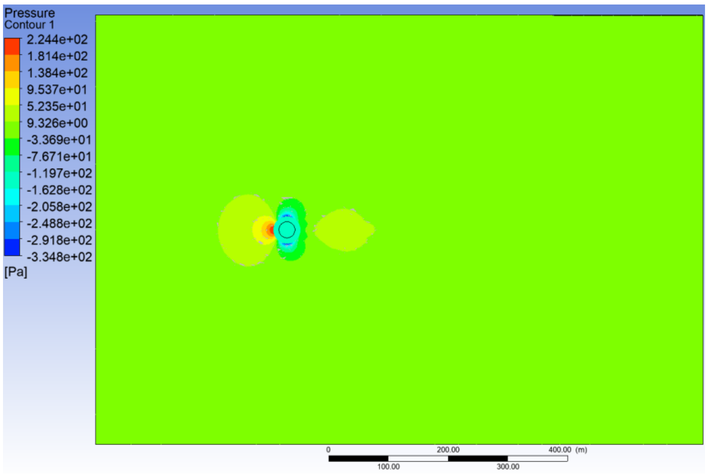


Рис. 4. Распределение ветрового давления для отдельно стоящей градирни на высоте 5 м (рисунок авторов)

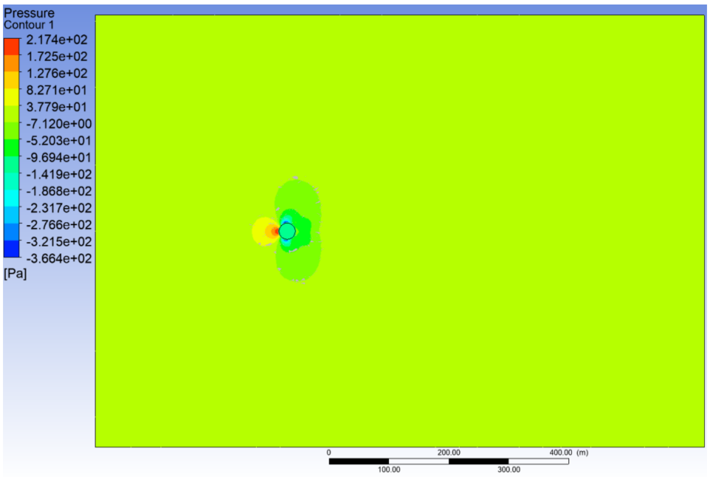


Рис. 5. Распределение ветрового давления для отдельно стоящей градирни на высоте 30 м (рисунок авторов)

На высоте 50 м минимальное и максимальное значение ветровой нагрузки: *min* = –230,128 Па; *max* = 141,526 Па.

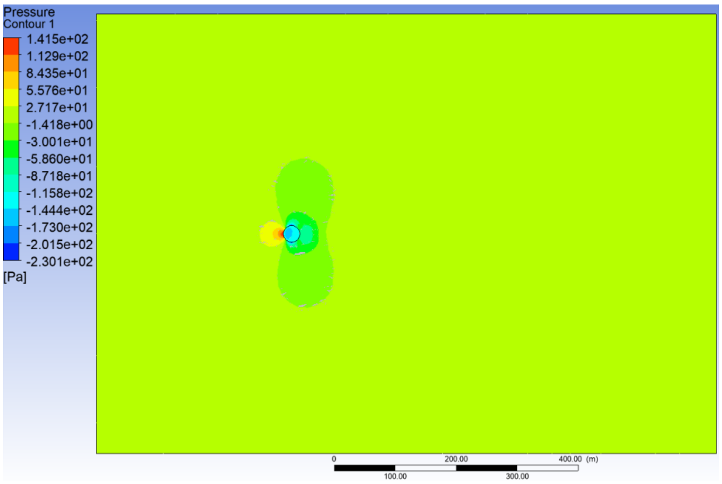


Рис. 6. Распределение ветрового давления для отдельно стоящей градирни на высоте 50 м (рисунок авторов)

На рис. 7 а представлено распределение ветрового давления по окружности для гиперболоидных градирен в соответствии с СП 340.1325800.2017. По СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» для сооружений и

конструктивных элементов с круговой цилиндрической поверхностью характер эпюры ветрового давления имеет вид, показанный на рис. 7 б. И в том, и в другом случае аэродинамические коэффициенты в различных точках по окружности принимаются независящими от высоты.

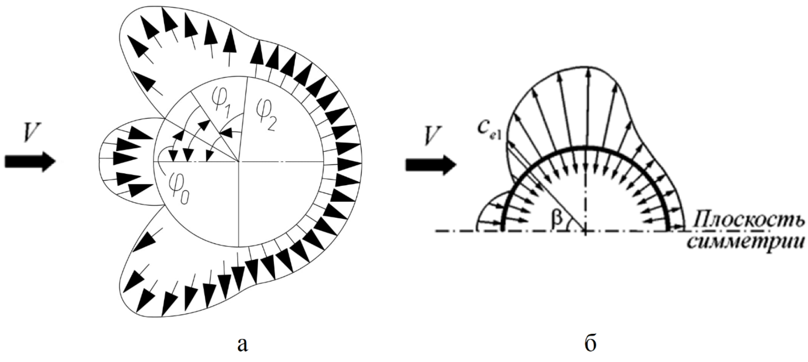
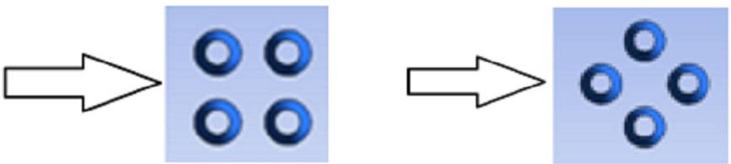


Рис. 7. Отдельно стоящая градирня. Распределение ветрового давления по:
а) СП 340.1325800.2017; б) СП 20.13330.2016 (рисунок авторов)

Из рис. 4-6 видно, что характер распределения ветрового давления по окружности зависит от высоты, что не учитывается в действующих нормах (рис. 7) Но в целом эпюра распределения ветрового давления по окружности на некоторых отметках похожа на представленную в СП 20.13330.2016 и СП 340.1325800.2017.

Далее рассмотрены 2 варианта распределения ветрового давления для нескольких близко расположенных градирен (рис. 8).



а) б)

Рис. 8. Близко расположенные гиперболоидные градирни.
Варианты расположения (стрелкой указано направление действия ветра) (рисунок авторов)

Изополя ветрового давления на различных отметках приведены на рис. 9-11.

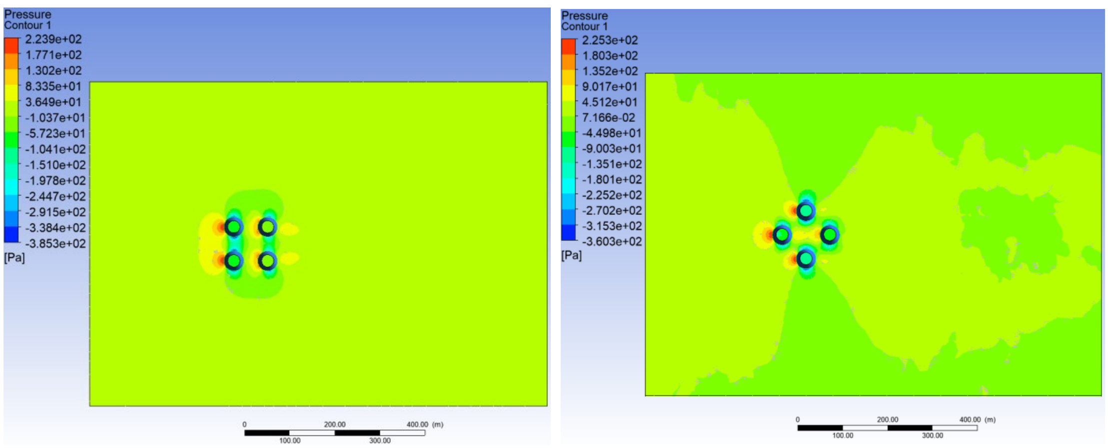


Рис. 9. Распределение ветрового давления для нескольких градирен на высоте 5 м (рисунок авторов)

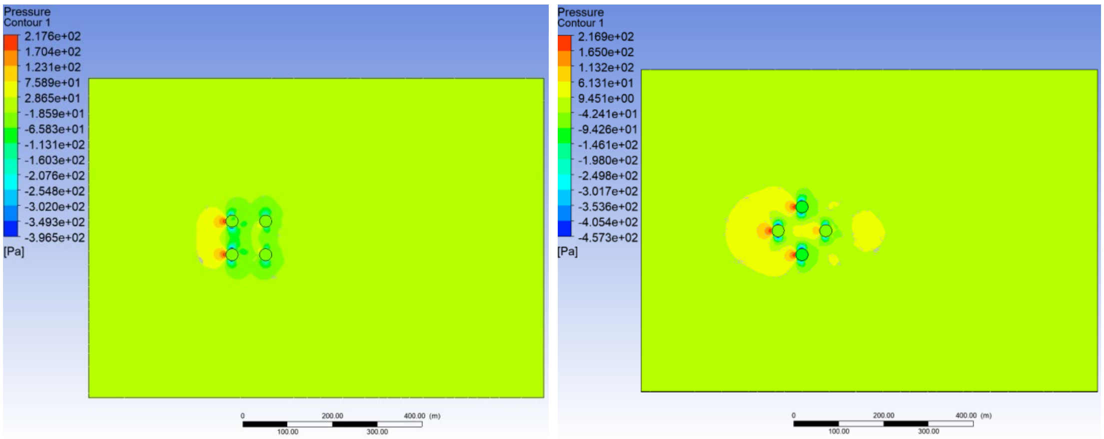


Рис. 10. Распределение ветрового давления для нескольких градирен на высоте 30 м (рисунок авторов)

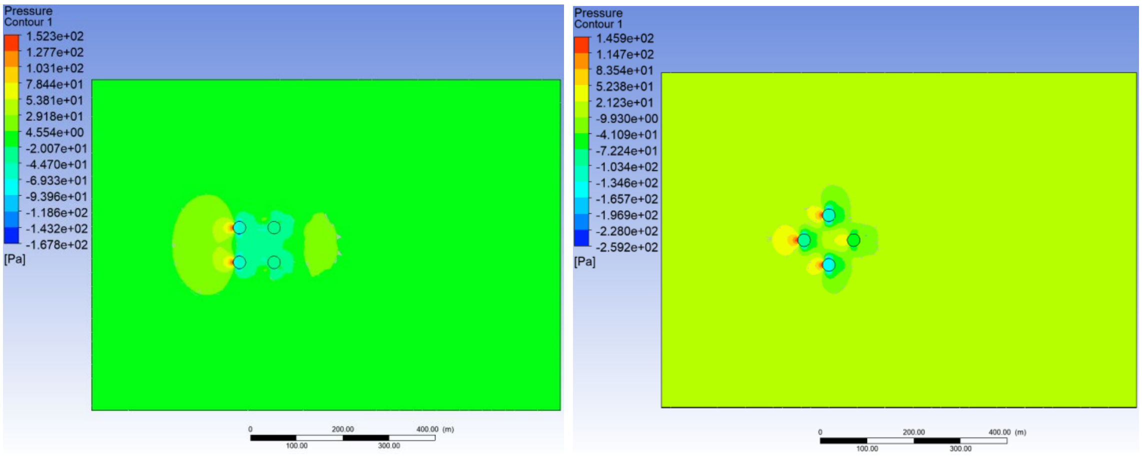


Рис. 11. Распределение ветрового давления для нескольких градирен на высоте 50 м (рисунок авторов)

Результаты расчета по максимальным и минимальным значениям ветрового давления сведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальное и минимальное значение ветрового давления на различных отметках по высоте (в локальном диапазоне)

Отметка, м	Вариант А		Вариант Б	
	min	*max*	*min*	*max*
5	–385,25	223,937	-360,33	225,325
30	–396,52	217,609	-457,27	216,811
50	–167,84	152,322	-259,18	145,853

На глобальном диапазоне минимальное и максимальное значение ветровой нагрузки:

Вариант А: *min* = –427,736 Па, *max* = 224,987 Па.

Вариант Б: *min* = –458,595 Па, *max* = 226,626 Па.

Из табл. 1 видно, что наблюдается расхождение между минимальными значениями ветрового давления при расположении градирен по схеме А и Б, которое составляет 6,7 %. Также наблюдается различие значений

минимального ветрового давления для одной и четырех близко расположенных градирен, которое составляет для А – 11,5 %, для Б – 17,4 %.

Обсуждения и заключение. Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов исследования базируется на применении верифицированного программного комплекса ANSYS. На основе численного анализа получены следующие результаты:

1. Распределение ветрового давления на гиперболоидную градирню по окружности в зависимости от высоты меняется, что не отражают действующие нормы.

2. Установлено расхождение результатов численного моделирования в программном комплексе ANSYS 2019 с положениями СП 340.1325800.2017 «Конструкции железобетонные и бетонные градирен. Правила проектирования». По действующим нормам коэффициент помех, повышающий расчетную величину ветрового давления, составил 2,26, что существенно больше 1, а при моделировании в ANSYS фактический коэффициент помех оказался равным 1,115 для варианта А и 1,174 для варианта Б. Таким образом, расчет ветрового давления по актуальным нормам проектирования может приводить к избыточным запасам прочности.

Библиографический список

1. Осипов, С. Н. Использование воздушных прослоек в ограждениях зданий для энергосбережения при кондиционировании воздуха/ С. Н. Осипов, С. Л. Данилевский, А. В. Захаренко // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2017. — № 5. — С. 470–483. — DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-470-483

2. Трушин, С. И. Влияние физической нелинейности на расчётные показатели устойчивости гибких сетчатых однополостных гиперболоидов вращения с образующими различных форм / С. И. Трушин, Ф. И. Петренко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. —2017. — № 4. — С. 50–56. — DOI: 10.22363/1815-5235-2017-4-50-56

3. Сальков, Н. А. Общие принципы задания линейчатых поверхностей. Часть 2. / Н. А. Сальков // Геометрия и графика. — 2019. — Т. 7. — № 1. — С. 14–27. — DOI: 10.12737/article_5c9201eb1c5f06.47425839

4. Щербакова, М. А Обеспечение энергетической и экологической безопасности при модернизации предприятий теплоэнергетики / М. А. Щербакова, Л. И. Осадчая, Л. А. Ничкова // Экономика строительства и природопользования. — 2021. — № 3 (80). — С. 13–18. — DOI: 10.37279/2519-4453-2021-3-13-18

5. Гусев, В. П. Оценка шумового воздействия развитой по мощности ТЭЦ на жилую застройку / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии — 2021. — Т. 2 (34). — С. 123–137. — DOI: 10.21869/2311-1518-2021-34-2-123-137

6. Немировский, Ю. В. Термонапряженное состояние многослойного полиармированного однополостного гиперболоида вращения / Ю. В. Немировский, А. И. Бабин, Е. А. Сальский // Научный вестник НГТ. — 2016. — № 3 (64). — С. 106–116. — DOI: 10.17212/1814-1196-2016-3-106-116

7.Бакулин, В. Н. Блочная конечно–элементная модель для послойного анализа напряжённо-деформированного состояния трехслойных оболочек с нерегулярной структурой / В. Н. Бакулин // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2018. — № 4. — С. 66–73. — DOI: 10.31857/S057232990000701-1

8. Сивак, С. А. Комбинированный векторный метод конечных и граничных элементов для задачи распространения электромагнитного поля с учетом вихревых токов / С. А. Сивак, И. М. Ступаков, Н. С. Кондратьева // Научный вестник НГТУ. — 2018. — Т. 73. — № 4. — С. 79–90. — DOI: 10.17212/1814-1196-2018-4-79-90

9. Моделирование процессов теплообмена внутри герметичного корпуса бинс в мультифизичной постановке в ansys cfx и system coupling / А. А. Медельцев, П. А. Шаповалов, М. В. Воронов [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2022. — № 1 (225). — С. 140–152. — DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-140-152

10. Numerical simulation of cavitation surge and vortical flows in a diffuser with swirling flow / B. Ji, J. Wang, X. Luo, [et. al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. — 2016. — Vol. 30. — Pp. 2507–2514. — DOI: 10/1007/s12206-016-0511-0

11. Манеев, А. П. Влияние ветра на фильтрацию газов через оболочку дымовых труб / А. П. Манеев, М. И. Низовцев, В. И. Терехов // Теплоэнергетика. — 2013. — № 4. — С. 20–26. — DOI: 10.1134/S0040363613040061

12. Газаров, А. Р. Исследование возможности применения компьютерных программ и решений для анализа и обработки параметров аэродинамики сооружений / А. Р. Газаров //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 3. — С. 236–239. — DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-236-239

13. Кузнецов, В. С. Усилия в зданиях призматической формы при различном распределении ветрового воздействия / В. С. Кузнецов, А. А. Шурушкин //Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. — 2021. — № 5. — С. 31–39. — DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-31-39

14. Лампси, Б. Б. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие / Б. Б. Лампси, С. С. Шилов, П. А. Хазов // Вестник МГСУ. — 2022. — Т. 17. — № 1. — С. 21–31. — DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31

15. Иноземцева, О. В. Устойчивость против опрокидывания в практике проектирования высотных зданий/ О. В. Иноземцева, В. К. Иноземцев, Г. Р. Муртазина // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2021. — Т. 17. — № 3. — С. 228–247. — DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-3-228-247

Поступила в редакцию 26.12.2022

Поступила после рецензирования 29.12.2022

Принята к публикации 09.01.2023

Об авторах:

Дутов Владислав Викторович — магистрант кафедры «Сопротивление материалов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, vlad553188@gmail.com.

Чепурненко Антон Сергеевич — профессор кафедры «Сопротивление материалов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент, ScopusID, ORCID, anton_chepurnenk@mail.ru.

Заявленный вклад соавторов:

В. В. Дутов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. А. С. Чепурненко — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.